

水素添加による金属燃料高速増殖炉の反応度係数の向上に関する研究

著者	辻本 和文
号	1783
発行年	1995
URL	http://hdl.handle.net/10097/7056

氏 名	辻 本 和 文
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学 位 授 与 年 月 日	平 成 8 年 3 月 26 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項
研 究 科 , 専 攻 の 名 称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 原子核工学専攻
学 位 論 文 題 目	水素添加による金属燃料高速増殖炉の反応度係数の向上に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 平川 直弘
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 平川 直弘 東北大学教授 中村 尚司 東北大学教授 戸田 三朗 東北大学助教授 馬場 護

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

我が国はエネルギー資源に乏しく、長期的かつ地球規模のエネルギー安全保障を考えるならば、高速増殖炉を中核とした核燃料サイクルの確立によるプルトニウムの平和利用を着実に進めていく必要がある。しかし、チェルノブイリ原子力発電所の事故以来、国民の間に原子力利用に対する漠然とした不安が広がっていることも事実である。したがって 21 世紀を見据えた将来の高速増殖炉が備えるべき条件としては、高い経済性と高い安全性を有することが挙げられる。こうした点から、これまでの高速炉設計で考えられてきた酸化物燃料に比べて、金属燃料を使用した高速炉が高い経済性を有するものとして近年注目されているが、金属燃料炉心は酸化物炉心と比べて安全性という面で不利である。そこで本研究では金属燃料の利点を生かしつつ、安全面での向上を図るべく金属燃料炉心中に水素を添加することにより反応度係数を改善する炉心概念について提案し、こうした炉心の基礎的研究を行うために水素添加金属燃料高速炉模擬体系における実験・解析を行う。

第 2 章 水素添加金属燃料高速増殖炉の模擬実験

本章では、日本原子力研究所の高速炉臨界実験装置 (FCA) で行った水素添加金属燃料高速炉の模擬実験について述べる。実験の目的は、水素を添加することによる金属燃料高速炉の反応度係数の向上を実験的に確認することと、水素添加金属燃料高速炉の計算精度の評価や炉心性能の評価に資するべき基礎的なベンチマークデータを取得することにある。従って実験では、炉心構成の自由度が比較的大きいという FCA の特徴を生かし、ポリスチレン板を配した金属燃料模擬燃料体を用い、このポリスチレン板のボイド率が 45%, 80%, 95% とした燃料体を用いることにより、炉心中の水素量を系統的に変えた 3 つの炉心を構築し、それぞれの炉心において同一の測定を行った。この時の各炉心中の水素と燃料核種の原子数密度の比 ($H/H.M.$) は、それぞれ 0.13, 0.053, 0.022 である。各炉心で測定した反応度係数は、高速炉の安全性を評価する上で特に重要となるドップラー効果とナトリウムボイド効果である。ドップラー効果は、25mm ϕ \times 150mm の天然ウラン金属及び天然ウラン酸化物のサンプルを用いて、サンプル加熱法により 800℃ までのドップラー効果を測定した。またナトリウムボイド効果は、炉心中心部のステンレス製の缶に封入されたナトリウム板を同一寸法のステンレス製の空の缶と置換することにより測定した。さらに他の炉物理量として、燃料や制御棒、構造材等を構成する物質の反応度価値、炉心中心小ボイド内における箔放射法による反応率比、燃料セル内における微細

反応率分布の測定を行った。

実験の結果、炉心中の水素量を増加することによりドップラー効果及びナトリウムボイド効果が向上することを確認した。また水素添加金属燃料高速炉体系の基礎的なベンチマークデータとなる貴重な結果を取得した。

第3章 実験解析と計算手法の検討

本章では第2章で述べた水素添加金属燃料高速炉模擬実験の実験解析を行い、水素添加金属燃料体系における従来の高速炉用計算コードの適用性を検討する。水素添加金属燃料体系においては、酸化物燃料や金属燃料を用いたこれまでの高速炉体系とはスペクトル形状が全く異なり、ドップラー効果、ナトリウムボイド効果及び反応率等の核特性における高エネルギー領域、共鳴エネルギー領域等の持ち分が大きく変化する。そこで、水素添加体系における従来の高速炉用標準コードの適用性を検討することを目的とし、水素添加金属燃料模擬実験の解析を行う。使用した計算コードは、高速炉の設計計算やこれまでのFCAの実験解析で標準的に用いられてきたものであり、代表的なものとしてセル計算コードSLAROM、拡散計算コードCITATION-FBR、摂動計算コードPERKYが挙げられる。また計算に使用した核データは、最新のJENDL-3.2である。

解析結果のうち特にドップラー効果とナトリウムボイド効果に注目すると、解析値と実験値の比(C/E)がほぼ0.9～1.1であり、実験値との差はほぼ10%以内であったが、C/E値が炉心内の水素量に依存する傾向を示した。すなわち、炉心中の水素量が多いとC/E値は1.0より大きく実験値を過大評価する傾向にあり、逆に水素量が少ないときは実験値を過小評価する結果となった。このC/E値が水素量に依存する原因として、高速炉用標準セル計算コードSLAROMに以下に示すようないくつかの問題点があることを指摘した。

(1) 下方散乱の近似的な取り扱い法

(2) 1次元円柱モデルにおけるダンコフ係数の評価方法

また、これらの点が反応度係数に与える影響について詳細に検討を行うため、軽水炉用標準セル計算コードであるSRACコードを使用した解析も行った。この結果、ドップラー効果に対してはC/E値の水素量依存性も無く実験値と2%以内で良く一致するものの、ナトリウムボイド反応度係数に対しては水素量に対するC/E値の依存性は見られないものの、実験値を20%も大幅に過小評価することが分かった。この原因としてSRACコードの断面積ライブラリーに問題がある可能性を指摘した。

本章の最後に、以上述べたような結果から現段階での水素添加金属燃料高速炉の解析には、SLAROMコードを用いるべきであることを述べ、水素添加炉心の設計計算に資するべく反応度係数の計算精度の評価を行った。

第4章 水素添加金属燃料高速増殖炉の核設計

本章では、水素添加金属燃料高速炉模擬体系における実験・解析の結果を踏まえて、実機を想定した水素添加大型(1000MWe級)金属燃料高速増殖炉の炉心特性の評価を行う。まず実機を想定した炉心への水素化合物の添加方法として、水素化ジルコニウム(ZrH)だけからなるピンを炉心燃料集合体中に数本添加する炉心概念を提案した。この炉心の燃料集合体中のZrHピンの割合を約1%～5%までパラメトリックに変化させ、この時の反応度係数、燃焼特性の評価を行った。その結果、ZrHを約3%程度炉心に加えることにより金属燃料はもとより、従来の炉心設計で用いられてきた酸化物燃料炉心よりも、ドップラー係数、ナトリウムボイド反応度といった最も重要な反応度係数を向上させる事ができることを示した。また燃焼解析の結果から、ZrHを添加する事による増殖比、燃焼欠損反応度への悪影響も最小限に抑えることが可能であることが分かった。さらにZrH添加による反応度係数の向上効果を、スクラム失敗を伴う制御棒誤引き抜き事故及び冷却材流量喪失事故における炉心挙動の解析においても確認した。

第5章 結 論

本研究では将来にわたるエネルギーの安定供給源としての金属燃料高速増殖炉に着目し、この安全性を高めるために水素添加により反応度係数を向上させることを提案した。こうした炉心の炉心特性を検討するため臨界実験を行い、水素添加によるドップラー効果とナトリウムボイド反応度の向上を実験的に確認した。また水素添加体系での反応度係数の解析手法についていくつかの提案を行い、従来の高速炉用標準コードの適用性の限界について指摘した。さらに臨界

実験の結果をふまえて、実機を想定した水素添加金属燃料高速炉の基本的な特性を検討し、十分成立性のあるものであることを示した。

審 査 結 果 の 要 旨

高速増殖炉は長期的な原子力エネルギーの利用のために不可欠であると考えられているが、現在開発の主流を占めている酸化燃料高速炉（以下 MOXFBR）は軽水炉に比し経済的競争力に欠けるという指摘がなされている。これに対し近年コストダウンに資する燃料として高燃焼度に耐える金属燃料が開発され注目されるようになった。しかしながら、金属燃料高速炉は、安全上重要なドップラー温度係数、ナトリウムボイド係数が MOXFBR に比し不利であるという問題点を有する。本論文は燃料集合体中の燃料棒の一部を水素化ジルコニウム（以下 ZrH）よりなる棒に置換することによって炉の中性子スペクトルを軟化させ、これによって負のドップラー温度係数を大きく、正のナトリウムボイド係数を小さくすることを考案し、その妥当性を臨界実験装置を用いて実験的に検証したもので、全編 5 章よりなる。

第 1 章は序論であり、金属燃料高速炉の特色と、減速材添加高速炉の概念について述べている。

第 2 章では日本原子力研究所の高速炉臨界実験装置（FCA）において水素添加の効果を検証するために行った実験について述べている。すなわち、金属燃料高速炉を模擬する炉心のナトリウム板の一部をポリスチレン板に代え、そのボイド率を 45%、80%、95% と変えることによって炉心の水素含有量を系統的に変化させ、サンプル加熱法によりドップラー効果を、また中心部分のナトリウム板をボイド缶に置換することによりナトリウムボイド効果を測定している。同時に水素添加炉心の計算精度の評価、炉心性能の評価に資するため、物質反応度値、反応率等の実験データを取得している。これらは水素添加金属燃料高速炉のベンチマークデータとなるもので重要な成果である。

第 3 章では第 2 章で述べた実験結果を従来から高速炉設計に用いられてきた標準的な計算コードを用いて解析している。その結果解析値と実験値との比（C/E）が全体的には 10% 以内に収まるものの、炉心内の水素量に依存する傾向を持つことを明らかにし、その原因が高速炉用標準セル計算コード SLAROM に問題のあるためであることを述べている。一方標準的な熱中性子炉用計算コード SRAC を用いれば C/E の水素密度依存性を解消でき、ドップラー効果については実験値とよく合う効果を得たが、ナトリウムボイド係数は大幅な過小評価となり、その原因は使用する断面積ライブラリーにあることを指摘している。

第 4 章では前章までの結果をふまえて電気出力 1000MW の水素添加金属燃料高速炉の核設計を行い、ZrH 棒を約 3 % 非均質に装荷することによって、従来の MOXFBR より反応度係数を向上させ、かつ ZrH を装荷することによる増殖比、燃料燃焼反応度への悪影響が最小限に抑えられることを示している。さらに ZrH 添加による反応度係数向上の効果を、スクラム失敗（ATWS）を伴う制御棒引き抜き事故および冷却材流量喪失事故の過渡解析により確認している。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は将来有望であると期待されている金属燃料高速炉の核的安全性を水素化合物の添加により向上させることの可能性を、実験的、解析的に示したものであって、原子核工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。